

# 女川原子力発電所2号炉

## 地震時における燃料被覆管の 閉じ込め機能の維持について

---

平成31年4月2日  
東北電力株式会社

1. はじめに
2. 基本方針
  - 2.1 要求事項の整理
  - 2.2 追加要求事項への適合性に係る設計方針
3. 追加要求事項に係る評価項目の選定
4. 地震時の燃料被覆管閉じ込め機能評価方針
5. 燃料被覆管応力評価条件
6. 評価手法
  - 6.1 応力評価手法
  - 6.2 疲労評価手法
7. 評価結果
8. まとめ

## 1. はじめに

---

- 従来、燃料被覆管の応力評価に関しては、燃料の健全性を確認する観点から、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に発生する応力を考慮し、燃料被覆管の応力設計比の評価を行っている。【原子炉設置(変更)許可申請書添付書類八及び燃料体設計認可申請書添付書類Ⅱ(応力解析)】  
また、崩壊熱除去可能な形状の維持の観点から、地震時の一次応力も考慮した応力評価を実施している。【工事計画認可申請書及び燃料体設計認可申請書添付書類Ⅱ(耐震解析)】
- 一方、平成29年8月30日の原子力規制委員会において「実用発電用原子炉及びその附属施設的位置、構造及び設備の基準に関する規則」の改正が決定、平成29年9月11日に施行され、地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能の維持についての要求が追加された。
- 本資料では、地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能の維持に係る設計方針及び基準適合性の見通しについて説明する。なお、詳細評価については工事計画認可申請で説明する。

## 2. 基本方針(1/2)

### 2.1 要求事項の整理

□ 以下に改正された設置許可基準規則第4条及び同規則の解釈を示す。

設置許可基準規則 第4条(地震による損傷の防止)	設置許可基準規則の解釈 第4条(地震による損傷の防止)	備考
設計基準対象施設は、地震力に十分に耐えることができるものでなければならない。	一 第1項に規定する「地震力に十分に耐える」とは、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に生じるそれぞれの荷重と、弾性設計用地震動による地震力(本規程別記2第4条第4項第1号に規定する弾性設計用地震動による地震力をいう。)又は静的地震力(同項第2号に規定する静的地震力をいい、Sクラスに属する機器に対し算定されるものに限る。)のいずれか大きい方の地震力を組み合わせた荷重条件に対して、炉心内の燃料被覆材の応答が全体的におおむね弾性状態に留まることをいう。	解釈 追記
5 炉心内の燃料被覆材は、基準地震動による地震力に対して放射性物質の閉じ込めの機能が損なわれるおそれがないものでなければならない。	二 第5項に規定する「基準地震動による地震力に対して放射性物質の閉じ込めの機能が損なわれるおそれがない」とは、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に生じるそれぞれの荷重と基準地震動による地震力を組み合わせた荷重条件により塑性ひずみが生じる場合であっても、その量が小さなレベルに留まって破断延性限界に十分な余裕を有し、放射性物質の閉じ込めの機能に影響を及ぼさないことをいう。	追加 要求 事項

## 2. 基本方針(2/2)

### 2.1 要求事項の整理

- 本規則改正に伴う要求事項として、「実用発電用原子炉の燃料体に対する地震の影響の考慮について」(原子力規制庁, 平成29年2月15日)において以下のとおり示されている。

『…地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能の維持に係る評価として、より精緻化する観点から、地震力並びに地震力と重畳する可能性のある1次応力及び2次応力を加味した評価を実施することを求める必要がある。よって、原子力規制庁としては、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に、基準地震動 $S_s$ の地震が発生した場合でも、燃料被覆管の閉じ込め機能が維持できることを新たに要求し、耐震重要度分類Sクラスの耐震設計の考え方にならって、その判断基準として、基準地震動 $S_s$ の地震による1次応力を加味した運転状態における応力が設計引張強さを下回ること、また、弾性設計用地震動 $S_d$ の地震による1次応力を加味した運転状態における応力が設計降伏点を下回ることとしたい。』

### 2.2 追加要求事項への適合性に係る設計方針

- 追加要求事項への適合性を示すため、原子炉設置変更許可申請書に以下のとおり追記する。(本文)

炉心内の燃料被覆材の放射性物質の閉じ込めの機能については、以下のとおり設計する。

- ・弾性設計用地震動による地震力又は静的地震力のいずれか大きい方の地震力に対して、炉心内の燃料被覆材の応答が全体的におおむね弾性状態に留まるように設計する。
- ・基準地震動による地震力に対して、放射性物質の閉じ込めの機能に影響を及ぼさないように設計する。

(添付書類八)

炉心内の燃料被覆材の放射性物質の閉じ込めの機能については、以下のとおり設計する。

- ・通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に生じるそれぞれの荷重と、弾性設計用地震動による地震力又は静的地震力のいずれか大きい方の地震力を組み合わせた荷重条件に対して、炉心内の燃料被覆材の応答が全体的におおむね弾性状態に留まる設計とする。
- ・通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に生じるそれぞれの荷重と基準地震動による地震力を組み合わせた荷重条件により塑性ひずみが生じる場合であっても、その量が小さなレベルに留まって破断延性限界に十分な余裕を有し、放射性物質の閉じ込めの機能に影響を及ぼさない設計とする。

### 3. 追加要求事項に係る評価項目の選定

#### □ 構造強度設計での考慮事項

BWR燃料集合体は「沸騰水型原子炉に用いられる8行8列型の燃料集合体について(昭和49年12月25日 原子炉安全専門審査会)」に従い、構造強度設計で以下を考慮している。

- (1)被覆管にかかる応力は、設計応力強さ限界を超えないこと。
- (2)累積疲労サイクル数は、設計疲労寿命を超えないこと。
- (3)使用中に燃料棒の変形等による過度の寸法変化を生じないこと。

#### □ 地震動の影響を考慮すべき評価項目

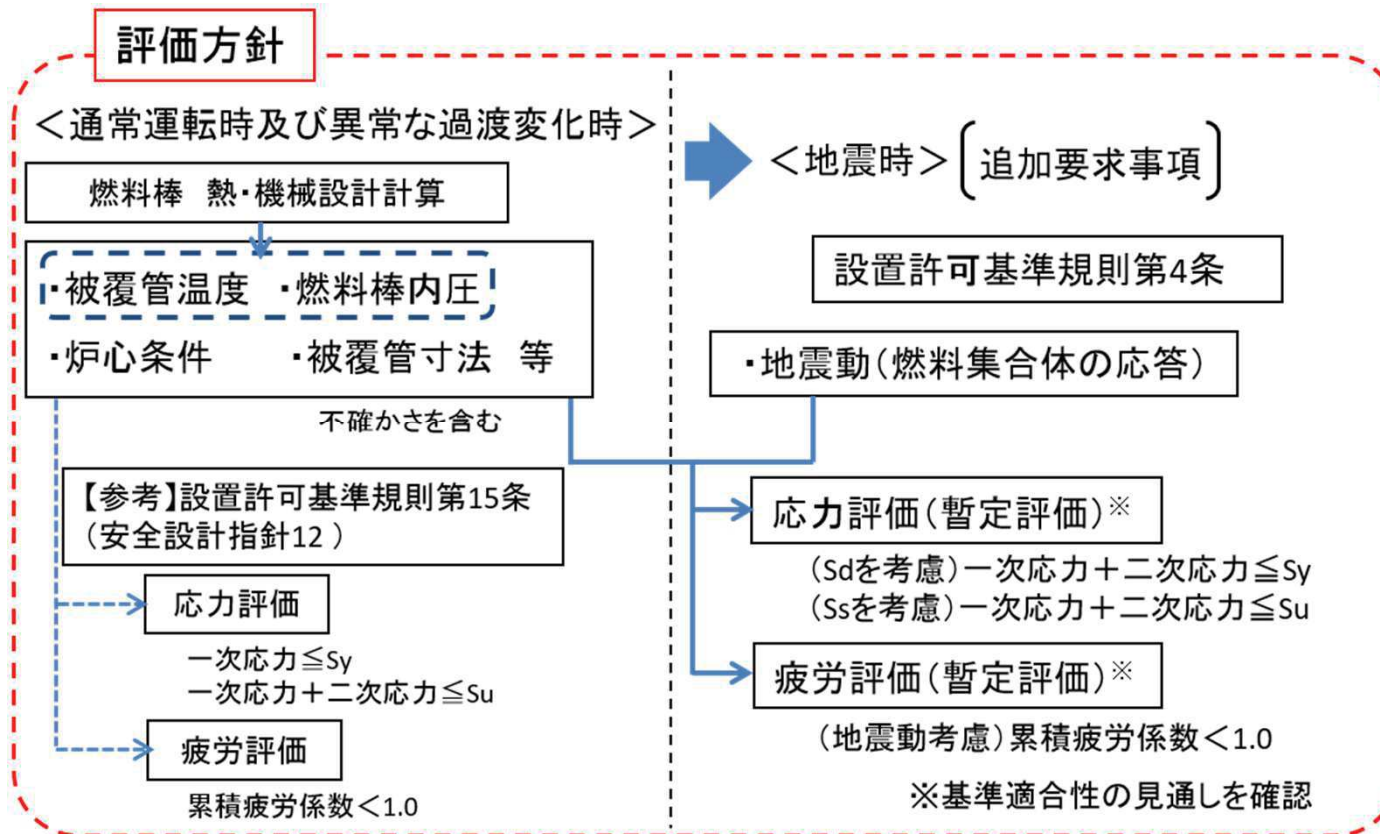
地震動により燃料被覆管に外力として応力が作用し、また、地震動が継続する間繰り返し応力として作用するため、上記の内、(1)及び(2)について地震影響を考慮した評価を行う。

(3)の燃料集合体に異常な寸法形状変化を生じさせないための以下の配慮は地震の影響が問題とならないことから評価対象としない。

- ・燃料被覆管製造時における残留応力除去
- ・スペーサによる燃料棒の間隔保持及び燃料棒の軸方向伸縮を拘束しない接触圧保持
- ・上部タイプレートを通して燃料棒の軸方向伸びを自由に逃げられるようにすること
- ・スペーサ等によるウォータロッドと燃料棒の軸方向伸びの差への処置

## 4. 地震時の燃料被覆管閉じ込め機能評価方針

- 通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に燃料被覆管にかかる荷重に加え、地震時の荷重を考慮。燃料棒熱・機械設計解析コードから得られる被覆管温度や燃料棒内圧のほか、冷却材圧力等の炉心条件や被覆管寸法、地震動に対する燃料集合体の応答加速度、応答変位等を入力値とした応力評価及び疲労評価を行う方針とする。



地震動として、平成25年12月原子炉設置変更許可申請時の弾性設計用地震動Sd及び基準地震動Ssを用いる。

## 5. 燃料被覆管応力評価条件

### □ 荷重の組合せと許容応力

「実用発電用原子炉の燃料体に対する地震の影響の考慮について」(原子力規制庁, 平成29年2月15日)に基づき応力評価基準を以下のように設定。

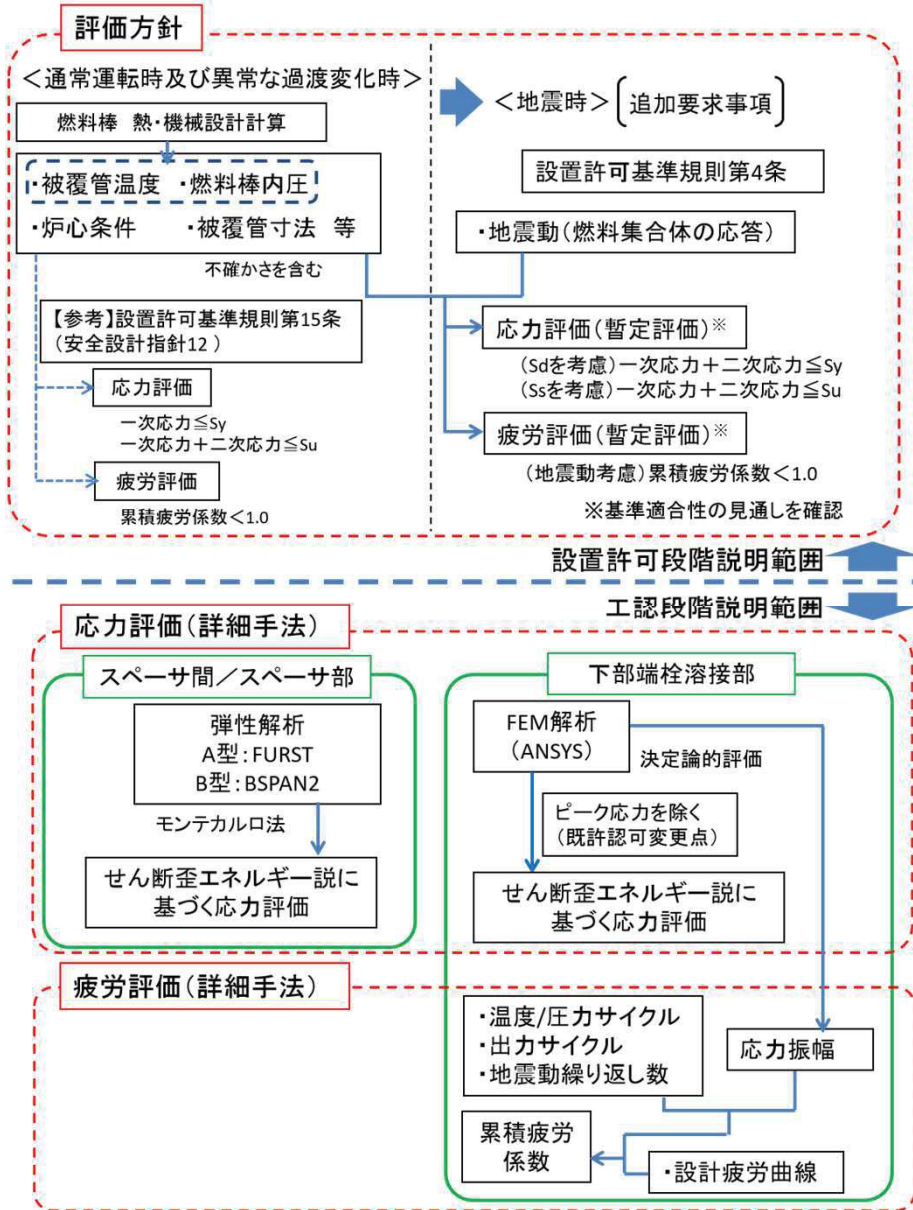
運転状態	要求機能	考慮すべき応力と地震動	許容応力
地震時	燃料被覆管の 閉じ込め機能	一次応力(Sdを考慮) +二次応力(Sdを考慮)	降伏応力(Sy)
		一次応力(Ssを考慮) +二次応力(Ssを考慮)	引張強さ(Su)

### □ (参考)従来の応力評価基準(BWR)

運転状態	要求機能	考慮すべき応力と地震動	許容応力
通常運転時 及び運転時 の異常な過 渡変化時	燃料被覆管の 閉じ込め機能	一次応力	降伏応力(Sy)
		一次応力+二次応力	引張強さ(Su)
地震時	崩壊熱除去可能な 形状の維持	一次応力	0.7Su



# 6. 評価手法(1/3)



燃料被覆管閉じ込め機能評価フロー

- 原子炉設置変更許可申請では、地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能の維持に係る設計方針及び基準適合性の見通しについて説明。
- 次のページより、基準適合性の見通しを示すため、評価方法及び評価結果についてまとめる。
- 評価手法の詳細は工事計画認可申請で説明する。

## 6. 評価手法(2/3)

### 6.1 応力評価手法

#### □ 応力評価対象部位

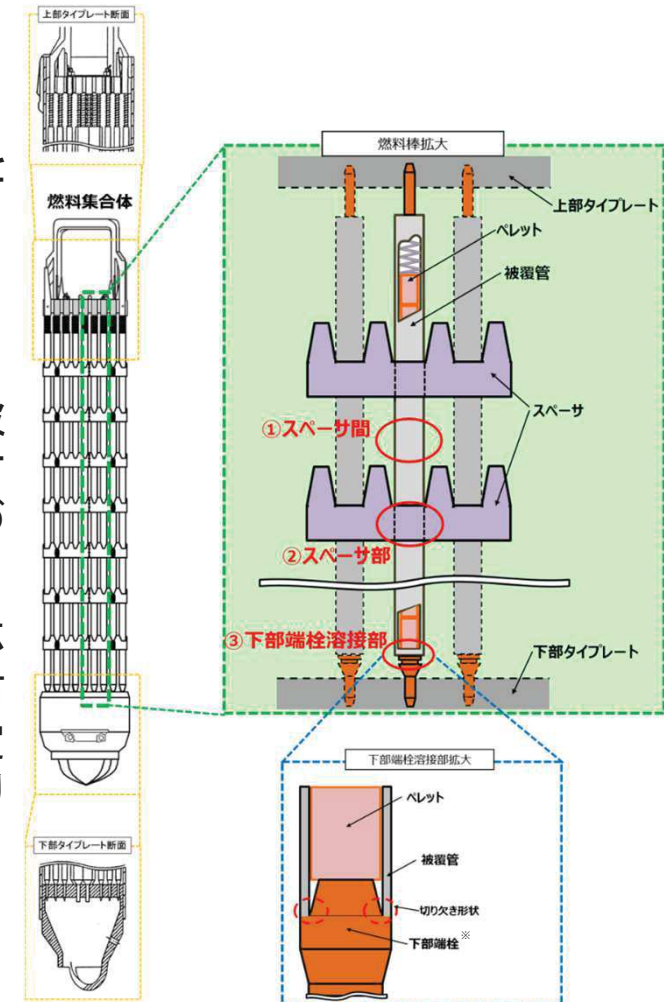
- 従来評価と同様、スペーサ間、スペーサ部、下部端栓溶接部とする。

#### □ スペーサ間・スペーサ部の応力評価手法

- 厚肉円筒式を用いた弾性解析を用いる。応力計算は、燃料被覆管に発生するすべての応力を三軸方向(半径方向, 円周方向及び軸方向)について解析し, せん断歪エネルギー説に基づき燃料被覆管の相当応力を求め応力設計比を評価。
- 応力設計比は, 被覆管温度, 燃料棒内圧, 炉心条件, 許容応力等の統計的入力変数の関数となる。入力変数の統計的分布として, 公称値と, 製造実績, 実機運転データ等を考慮して設定された標準偏差を弾性解析の入力とし, モンテカルロ法により統計評価を行い, 応力設計比の95%確率上限値を求める。

#### □ 下部端栓溶接部の応力評価手法

- 切り欠き形状を含む複雑形状のため有限要素法を用いる。入力変数には95%上下限值を使用し, 決定論的評価を行う。
- 切り欠き部の応力集中によるピーク応力を除いた, 一次応力と二次応力を評価。



※下部端栓の材料は燃料被覆管と同じジルコニウム合金(ジルカロイ-2)を使用。溶加材を用いずに突き合わせ溶接により燃料被覆管と溶接しており, 異種の溶接金属は使用していない。

評価対象部位(イメージ)

## 6. 評価手法(3/3)

### 6.2 疲労評価手法

#### □ 評価対象部位

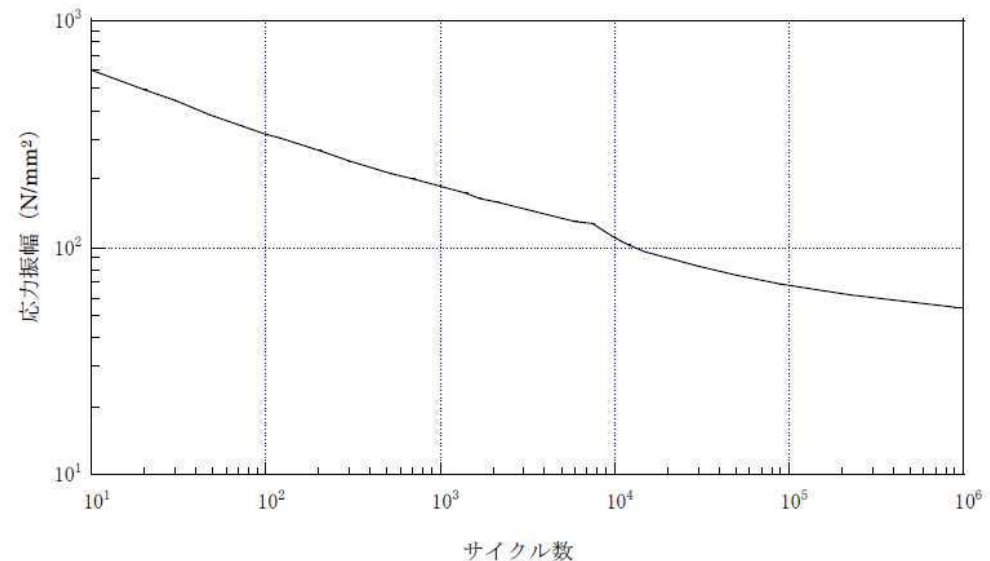
- 切り欠き形状を有し応力集中が発生する下部端栓溶接部を評価部位とする。

#### □ 疲労評価手法

- 疲労評価は累積損傷の法則(Minerの仮説)及びLanger-O' Donnellの考え方に基づく。
- 温度・圧力及び出力の予測サイクル<sup>[1]</sup>による累積疲労係数に加え, 地震動による繰り返し荷重を考慮した累積疲労係数が1.0未満であることを確認。
- 応力振幅は前述の有限要素法により, 切り欠き部の応力集中によるピーク応力を含めて評価。

#### □ 地震荷重の繰り返し数

- 繰り返し数は暫定条件として建設時の60回とその倍の120回を用い, それぞれについてS<sub>s</sub>, S<sub>d</sub>に対する評価を行う。



[1] 女川原子力発電所発電用原子炉設置(変更)許可申請書添付書類八

[2] W. J. O'Donnell and B. F. Langer, "Fatigue Design Basis for Zircaloy Components", Nuclear Science and Engineering, 20, 1-12 (1964)

ジルカロイの設計疲労曲線<sup>[2]</sup>

## 7. 評価結果(1/4)

### □ 応力評価結果

- ・通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に発生する応力に加えて地震による応力を考慮した場合においても、応力設計比は最大で9×9燃料(A型)で0.73及び9×9燃料(B型)で0.73であり、共に1.0より小さいことを確認した。

燃料被覆管応力の評価結果(9×9燃料(A型))

地震動と許容応力	運転条件	評価点	スペーサ間 (応力設計比)	スペーサ部 (応力設計比)	下部端栓溶接部 (応力設計比)
			一次応力+二次応力		
弾性設計用 地震動Sdに 対して降伏 応力Sy	圧力過渡※1	寿命初期	0.73	0.58	0.66
		寿命中期	0.27	0.25	0.31
		寿命末期	0.23	0.22	0.24
	出力過渡※2	寿命初期	0.70	0.49	0.60
		寿命中期	0.29	0.27	0.29
		寿命末期	0.24	0.22	0.22
基準地震動 Ssに対して 引張強さSu	圧力過渡※1	寿命初期	0.49	0.45	0.44
		寿命中期	0.30	0.27	0.34
		寿命末期	0.26	0.27	0.29
	出力過渡※2	寿命初期	0.49	0.40	0.41
		寿命中期	0.32	0.29	0.31
		寿命末期	0.27	0.26	0.26

※1: 負荷の喪失 ※2: 出力運転中の制御棒の異常な引き抜き

## 7. 評価結果(2/4)

### □ 応力評価結果

燃料被覆管応力の評価結果(9×9燃料(B型))

地震動と許容応力	運転条件	評価点	スペーサ間 (応力設計比)	スペーサ部 (応力設計比)	下部端栓溶接部 (応力設計比)
			一次応力+二次応力		
弾性設計用地震動Sdに対して降伏応力Sy	圧力過渡※1	寿命初期	0.68	0.73	0.64
		寿命中期	0.33	0.29	0.50
		寿命末期	0.27	0.26	0.48
	出力過渡※2	寿命初期	0.66	0.68	0.57
		寿命中期	0.35	0.30	0.45
		寿命末期	0.26	0.24	0.43
基準地震動Ssに対して引張強さSu	圧力過渡※1	寿命初期	0.53	0.53	0.44
		寿命中期	0.36	0.34	0.40
		寿命末期	0.32	0.30	0.39
	出力過渡※2	寿命初期	0.52	0.49	0.42
		寿命中期	0.38	0.36	0.37
		寿命末期	0.32	0.30	0.36

※1: 負荷の喪失 ※2: 出力運転中の制御棒の異常な引き抜き

## 7. 評価結果(3/4)

### □ 疲労評価結果

- ・評価結果が厳しくなる基準地震動 $S_s$ による地震力が繰り返された場合の応力振幅と繰り返し数、ジルカロイの設計疲労曲線を用いて評価された疲労係数の増分は0.00667(9×9燃料(A型))及び0.01071(9×9燃料(B型))となった。
- ・全寿命を通した累積疲労係数(約0.003<sup>[3]</sup>(9×9燃料(A型))及び約0.006<sup>[4]</sup>(9×9燃料(B型)))に、地震動による疲労係数増分を加えても累積疲労係数は1.0より小さいことを確認した。

燃料被覆管疲労の評価結果(9×9燃料(A型))

地震動	評価点	応力振幅 (N/mm <sup>2</sup> )	許容サイクル数 (回)	地震荷重の 繰り返し数(回)	疲労係数の 増分
基準地震動 $S_s$	寿命初期	90	$1.9 \times 10^4$	60	0.00316
				120	0.00632
	寿命中期	90	$1.9 \times 10^4$	60	0.00316
				120	0.00632
	寿命末期	91	$1.8 \times 10^4$	60	0.00333
				120	0.00667
弾性設計用 地震動 $S_d$	寿命初期	49	$1.0 \times 10^6$	60	0.00006
				120	0.00012
	寿命中期	49	$1.0 \times 10^6$	60	0.00006
				120	0.00012
	寿命末期	50	$1.0 \times 10^6$	60	0.00006
				120	0.00012

[3] 女川原子力発電所第2号機「燃料体設計認可申請書」(GNF燃設認第35号, 平成21年10月16日認可)

[4] 女川原子力発電所第2号機及び第3号機「燃料体設計認可申請書」(20原燃東 第802号, 平成21年1月7日認可)

## 7. 評価結果(4/4)

### □ 疲労評価結果

燃料被覆管疲労の評価結果(9×9燃料(B型))

地震動	評価点	応力振幅 (N/mm <sup>2</sup> )	許容サイクル数 (回)	地震荷重の 繰り返し数(回)	疲労係数の 増分
基準地震動 S <sub>s</sub>	寿命初期	112	1.1 × 10 <sup>4</sup>	60	0.00536
				120	0.01071
	寿命中期	110	1.2 × 10 <sup>4</sup>	60	0.00508
				120	0.01017
	寿命末期	109	1.2 × 10 <sup>4</sup>	60	0.00492
				120	0.00984
弾性設計用 地震動 S <sub>d</sub>	寿命初期	53	1.0 × 10 <sup>6</sup>	60	0.00006
				120	0.00012
	寿命中期	52	1.0 × 10 <sup>6</sup>	60	0.00006
				120	0.00012
	寿命末期	51	1.0 × 10 <sup>6</sup>	60	0.00006
				120	0.00012

## 8. まとめ

---

- 地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能の維持に係る設計方針を説明した。
- 地震動の暫定値による評価により、基準に適合する見通しを確認した。
- 詳細評価については工事計画認可申請で説明する。



## 参考 燃料集合体の燃料支持金具からの外れ対策

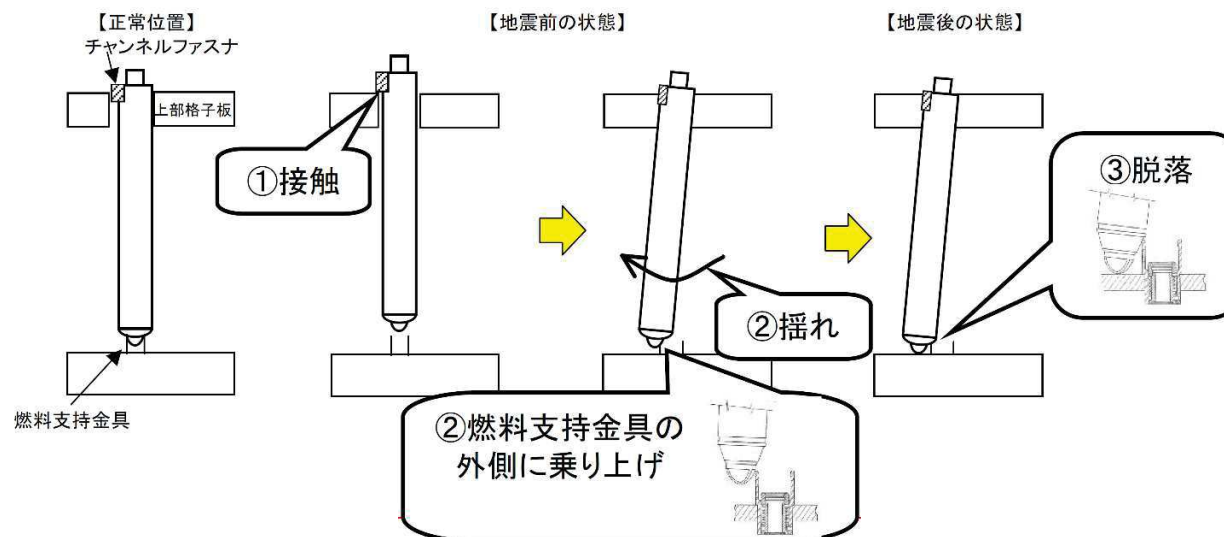
---

## 燃料集合体の燃料支持金具からの外れ対策(1/3)

- 平成19年11月、柏崎刈羽原子力発電所5号機にて、燃料集合体が正しい原子炉内の装荷位置から外れている事象(以下「本事象」という。)が確認された。
- 本事象については、「新潟県中越沖地震発生時の運営管理に係る教訓と課題」として、原子力施設情報公開ライブラリー(ニューシア)に登録されており、本事象の推定原因は以下のとおりとされている<sup>[5]</sup>。

・模擬燃料による装荷試験から、以下のメカニズムにより燃料集合体が燃料支持金具から脱落したと推定した。

- ①燃料交換機の座標設定が適切でなかったため、燃料を装荷する際にチャンネルファスナと上部格子板が接触した。
- ②接触時に燃料集合体の下降速度が十分減速されていなかったことから、接触により燃料が大きく揺れ、燃料集合体の下部先端部が燃料支持金具の外側に乗り上げた。
- ③新潟県中越沖地震の震動により、当該先端部が燃料支持金具から脱落した。



[5] 原子力施設情報公開ライブラリー 報告書番号2007-東京-M066 Rev.1

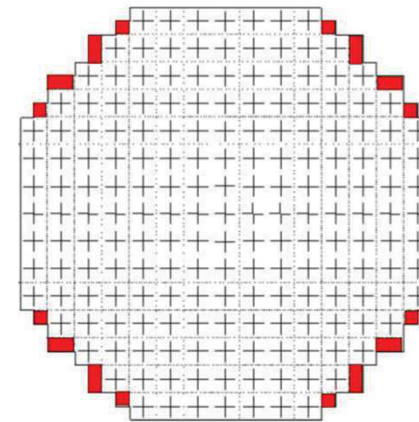
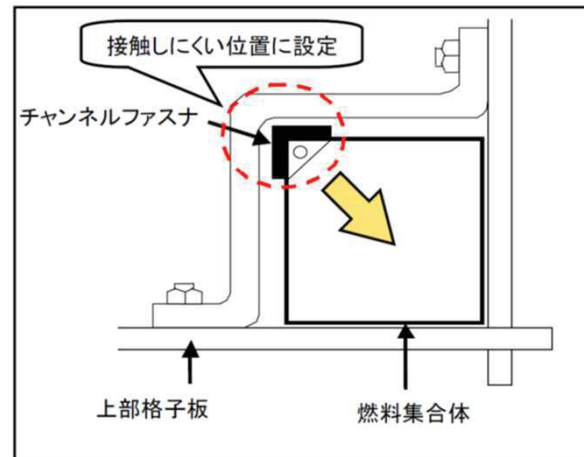
## 燃料集合体の燃料支持金具からの外れ対策(2/3)

□ 本事象の対策として以下の措置を講じることとされている<sup>[5]</sup>。

・燃料集合体が燃料支持金具から外れることを防止するため、以下の対策を実施する。

1. 燃料交換機の設定座標を、チャンネルファスナと上部格子板が接触しにくい位置に調整する。
2. チャンネルファスナと上部格子板が接触しても揺れが小さくなるように、燃料集合体の据え付け位置付近における下降速度を最低速度とする。

なお、最外周の燃料を装荷する際には、燃料集合体の高さ位置を確認するとともに、燃料交換機に加わっている荷重の変化を確認することとする。



■ チャンネルファスナと上部格子板が接触する可能性のある位置 (制御棒が隣接しない位置)

[5] 原子力施設情報公開ライブラリー 報告書番号2007-東京-M066 Rev.1

## 燃料集合体の燃料支持金具からの外れ対策(3/3)

- 女川原子力発電所においては、事象発生以前より下記のとおり対策を取り込んだ運用を実施している。
  - ・最外周燃料(制御棒が隣接しない位置の燃料)を装荷する際に、燃料交換機の設定座標を反チャンネルファスナ側へオフセットする
  - ・チャンネルファスナと上部格子板が接触する位置付近において、燃料装荷時の下降速度を最低速度とする
  - ・燃料装荷時に燃料集合体の高さ位置確認を実施し、また燃料交換機に加わる荷重変化を確認する
  
- なお、女川原子力発電所においては、東北地方太平洋沖地震においても燃料集合体の燃料支持金具からの外れは発生していない。